

角柱後流で振動する円柱に作用する非定常圧力

Unsteady pressure acting on a circular cylinder oscillating in the wake of a rectangular cylinder

野田 稔*・長尾文明**・和田浩行***・宗田和之****

Minoru Noda, Fumiaki Nagao, Hiroyuki Wada and Kazuyuki Muneta

*正会員 工博 徳島大学准教授 大学院ソシオテクノサイエンス研究部 (〒 770-8506 徳島市南常三島町 2-1)

**正会員 工博 徳島大学教授 大学院ソシオテクノサイエンス研究部 (〒 770-8506 徳島市南常三島町 2-1)

***非会員 工修 日立造船鉄構 (〒 592-8331 堺市西区築港新町 1-5-1)

****正会員 徳島大学技術職員 大学院ソシオテクノサイエンス研究部 (〒 770-8506 徳島市南常三島町 2-1)

The wake excitation of tandem circular cylinders is very complex phenomenon, because that is affected by the interaction between the motion of circular cylinders and the flow around those, and Reynolds number effect. To clarify the mechanism of this phenomenon, the wake excitation of a circular cylinder in the wake of a prism, which was replaced instead of a windward circular cylinder to reduce the effects of Reynolds number, was investigated by free vibration tests, unsteady pressure measurements and flow visualization tests. The ensemble rms pressure, which was defined as an fluctuating pressure asynchronizing with the motion of the circular cylinder, reflects the condition of the separation flow near the circular cylinder clearly. As the results of the unsteady pressure measurements and the flow visualization tests, it was clarified that the motion of the separation flows from the windward prism plays an important role on the wake excitation of the leeward circular cylinder.

Key Words : Wake excitation, tandem cylinder, Staggered arrangement, Forced oscillator
キーワード : ウェイクエクサイテーション, 並列柱, 千鳥配置, 強制加振機

1. はじめに

斜張橋の並列ケーブルに代表される並列円柱において、風下側の円柱が激しい空力振動を起こすことは一般によく知られており、ウェイクギャロッピング、ウェイクエクサイテーション、ウェイクフラッターの名で呼ばれている。この現象は振幅が大きく、構造物にとって深刻な問題であるため、多くの研究者がその発生機構について検討してきた。1),2),3),4),5) 従来の研究において、並列円柱の後流側円柱の応答特性は、円柱の配置状態とレイノルズ数に依存することが指摘されてきた。基本的にウェイクエクサイテーションは上流側円柱の後流と下流側円柱との相互作用によって発生すると考えられ、レイノルズ数は上流側円柱の後流の形成を変化させることで応答特性に影響していることが予想される。そのため、ウェイクエクサイテーションの発現機構として流れと円柱の運動との相互作用に着目する場合にはレイノルズ数の影響は2次的なものであると考えられ、ウェイクエクサイテーションの発現機構を検討する上で、取り除くべき影響と考えられる。そこで、著者らは後流の発生源である上流側円柱をレイノルズ数の影響を受けにくい角柱に置き換えてウェイクエクサイテーションの発生機構について検討することを試みた。

本論文では、上流角柱の大きさや設置位置を変化させた場合の下流円柱の応答特性を自由振動試験によ

て検討し、振動中の円柱に作用する非定常圧力計測および円柱周辺の流れの可視化試験を通して、ウェイクエクサイテーションの発現機構について検討した結果について述べる。

2. 実験概要

2.1 角柱配置の幾何学的パラメータ

図1に、上流側角柱と下流側円柱の配置状況および配置状況を表す幾何学的パラメータの定義を示す。図中に示すように、本研究では上流側角柱は正方形断面としている。ここで定義する幾何学的パラメータは3つあり、角柱の剥離点となる上流隅角部と下流側円柱との距離を表す c 、角柱の中心位置と円柱の中心位置の流れ直交方向の偏心量 e および角柱の大きさ d である。

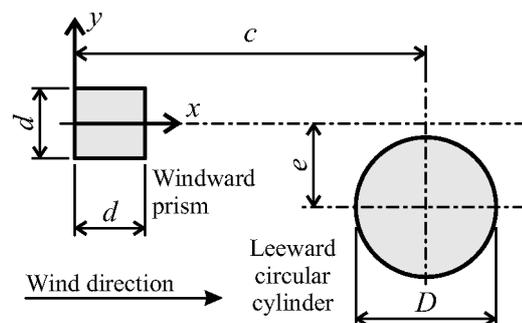


図-1 角柱配置の幾何学的パラメータ

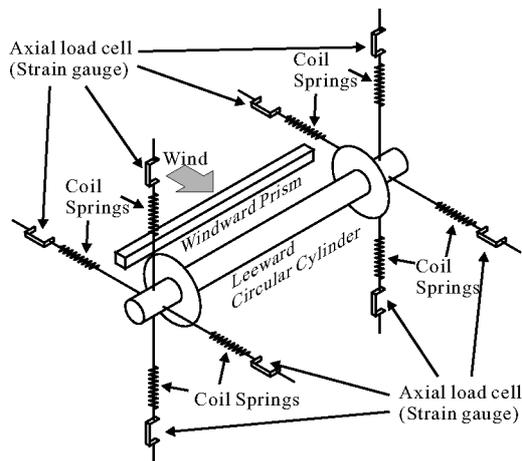


図-2 自由振動試験

表-1 振動諸元 (2自由度時)

	主流直交方向	主流方向
固有振動数	1.91 Hz	1.80 Hz
構造対数減衰率	0.0305	0.0170
Scruton 数	34.3	19.1

2.2 自由振動試験

自由振動試験は、幅 1m、高さ 1.5m、長さ 4m の測定胴を有する室内還流式風洞で実施した。図 2 に自由振動試験の概略図を示す。この実験における円柱の直径 D は 40mm であり、長さ L は 900mm である。円柱模型は、8 本のコイルばねによって主流方向、主流直交方向の 2 自由度状態で支持しており、ワイヤーによって主流方向あるいは主流直交方向の動きを拘束することで 1 自由度状態の応答実験も行った。

上流側の角柱は、 $d/D = 1/8$ または $d/D = 1/2$ の 2 種類とし、円柱中心から上流側に $c/D = 9/4$ の位置において側壁に固定した。一方、 e/D は 0 から $6/5$ の範囲で変化させた。なお、角柱の設置位置は無風の状態を設定しており、有風時には静的空気力の作用によって円柱の中立位置は変化することをあらかじめ断っておく。

円柱の主流方向および主流直交方向の変位量は、円柱を支持するばねの反力をロードセルで測定し、求めた。

表 1 および 2 に本実験における振動諸元を示す。換算風速 U/fD は、風速を変化させることによって 150 まで変化させたが、最大風速におけるレイノルズ数 $Re (= UD/\nu)$ はおよそ 3×10^4 である。また、角柱の辺長 d を基準にレイノルズ数を求めた場合、 $10^3 \sim 10^4$ のオーダーであり、角柱後流の性状はレイノルズ数の変化に対して急激な変化を起こさない領域⁶⁾となっている。

2.3 非定常圧力計測試験

非定常圧力計測試験では、直径 D が 70mm、長さ L が 900mm の円柱模型を用いた。模型は、幅 1m、高さ

表-2 振動諸元 (主流直交 1 自由度時)

固有振動数	1.91 Hz
構造対数減衰率	0.0305
Scruton 数	34.8

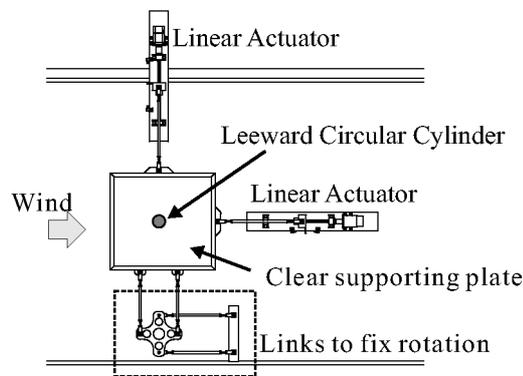


図-3 2 自由度強制加振装置

1.5m、長さ 4m の室内還流式風洞内に、図 3 に示す 2 自由度強制加振機で支持した。この 2 自由度強制加振機は、主流方向および主流直交方向に駆動する 2 機のリニアアクチュエーター 2 組によって円柱模型の両端を支持し、円柱模型の主流方向および主流直交方向の変位を独立に生じさせることができる装置であるが、ここでは、自由振動試験時に記録された主流方向および主流直交方向の応答変位に振動周期に対するアンサンブル平均を施して得られた応答変位を再現した。

模型のスパン中央断面には直径 1mm の圧力孔が等間隔に 72 個配置されており、多点同時圧力計によって振動中に円柱表面に作用する非定常圧力を計測した。このときのサンプリング周波数は 200Hz であり、サンプリング数は 60,000 である。

計測された圧力の時刻歴は、加振周期に対するアンサンブル平均を施し、振動 1 周期中の各位相における瞬間圧力を求めた。

なお、加振振動数 f はおよそ 0.98Hz であり、換算風速 U/fD はおよそ 150 である。従って、レイノルズ数 Re はおよそ 4.6×10^4 である。

2.4 流れの可視化試験

本研究では、非定常空気力と円柱周辺の流れの状況との対応関係を検討するため、円柱振動時の応答を強制加振法で再現し、角柱と円柱の間の流れの可視化試験を実施した。ここで用いた円柱模型は、非定常圧力の計測試験に用いたものと同じものであり、換算風速も 150 と非定常圧力計測試験時と同じであるが、映像を明瞭に撮影するために加振振動数を 0.4Hz とし、それに併せて風洞風速も低下させたため、レイノルズ数 Re はおよそ 1.8×10^4 となった。

この可視化試験では、角柱後流の外部流と内部流を

それぞれ把握するために、2通りの方法でトレーサーを導入した。外部流を可視化するためのトレーサーは、オイルミスト発生装置で生成した白煙を風洞上流から流下させることで作ったものであり、内部流を可視化するためのトレーサーは、角柱の背後に水平に張り渡したステンレス細線に電流を流して加熱し、細線表面に塗った流動パラフィン気化させることで生成した。

トレーサーを明瞭に撮影するために、本研究では上下から当てたハロゲンライトのスリット光と円柱模型スパン中央付近の内部に放射状に組み込まれた100個の白色LEDによるスリット光を光源として用い、高速度カメラを使って撮影をした。ここで、高速度カメラの撮影速度は毎秒500フレームである。

撮影された角柱の後流は、そのままではカルマン渦を含む複雑な様相を示しており、平均的な後流を把握することが困難なため、円柱の応答における同位相の画像をアンサンブル平均することでカルマン渦の複雑な流れを無視できるように画像処理を施した。

3. 角柱後流における円柱の応答特性

本節では、後流中の円柱の応答特性について述べる。図4および5に2自由度支持状態の円柱の応答を示す。図中の(a)および(b)は、換算風速 U/fD と主流直交方向の倍振幅 $2Y/D$ または主流方向の倍振幅 $2X/D$ との関係を示しており、(c)は $U/fD = 175$ の時刻歴応答波形をアンサンブル平均した1周期のリサージュ曲線を示している。また、(c)の図中に示されている2本の曲線は、風速分布から推定された単独正方形柱の後流の範囲を表しており⁷⁾、次式で表される。

$$\frac{b(x)}{d} = \sqrt{1.81 \frac{x}{d} + 1} \quad (1)$$

ここで、 $b(x)$ は角柱上流の隅角部からの距離 x における後流の幅であり、流速が低下している領域の幅で定義されている。

図6は、主流直交方向1自由度の支持条件における応答を示している。なお、主流方向1自由度の支持条件では応答は現れなかった。

これらの結果より、後流円柱の応答に対する角柱の配置パラメータの影響について検討する。

3.1 下流側円柱の応答に対する e/D の影響

図4および5は、角柱と円柱の偏心距離 e/D を変化させた場合の2自由度支持円柱の応答の変化を示したものである。この図から e/D の増加にあわせて、ウェイクエクサイテーションの発振風速は高まっており、応答は主流直交方向から主流方向へと卓越方向が変化していることがわかる。 $d/D = 1/8$ のケース(図4)では e/D が $1/5$ まで、 $d/D = 1/2$ のケースでは e/D が $2/5$ までの範囲において、発振風速付近に不安定なリ

ミットサイクルが存在し、ハードフラッターのような応答を示している。それ以上の e/D では、不安定なリミットサイクルは消失し、ソフトフラッターのような応答となっている。このことから、2自由度支持の状態では、偏心距離 e/D は発振風速と下流側円柱の応答の基本的な性質を決定付ける役割があると考えられる。

図6に示された主流直交方向1自由度支持の円柱の結果を見ると、いずれの d/D においても2自由度時の結果に比べて応答振幅が増加しており、発振風速は低下している。また、主流直交方向1自由度支持の状態では、 e/D が小さい範囲で不安定なリミットサイクルのないソフトフラッター的な応答を示し、 e/D の増加とともにハードフラッターのような応答へと移行しており、2自由度の際と逆の傾向となっている。ここで、1自由度支持の場合、主流方向への変位が拘束されており、2自由度支持の場合のように静的抗力による静的変位が生じることはなく、1自由度支持の場合と2自由度支持の場合では有風時の中立位置が $1D$ 近く異なっている。このため、両者の結果を直接同一条件と見なすことはできない。しかし、静的変位が小さい低風速時の応答振幅を比べても1自由度支持の方が2自由度支持の振幅に比べて大きいことが認められる。このことから、主流方向の運動は主流直交方向の応答を低減させ、これに e/D の影響が加わって応答の基本的な性質が決定付けられていると考えられる。

3.2 下流側円柱の応答に対する d/D の影響

ここでは、角柱の幅 d/D の変化と下流側円柱応答の関係について検討する。図4および5の $e/D = 0$ の結果を比べると、発振風速は $d/D = 1/2$ の時のほうが $d/D = 1/8$ のときに比べて低い風速となっており、応答振幅も $d/D = 1/2$ の方が大きくなっている。偏心させたケースについても同じ偏心量同士の結果を比べた場合、いずれも $d/D = 1/2$ の方が $d/D = 1/8$ の応答振幅を上回った結果となっている。

円柱の応答が角柱が起こす後流に起因していることを考えれば、円柱の応答振幅は角柱後流の相対的な幅によって決定付けられるものと考えことができ、以上の結果はそれを反映したものと解釈できる。

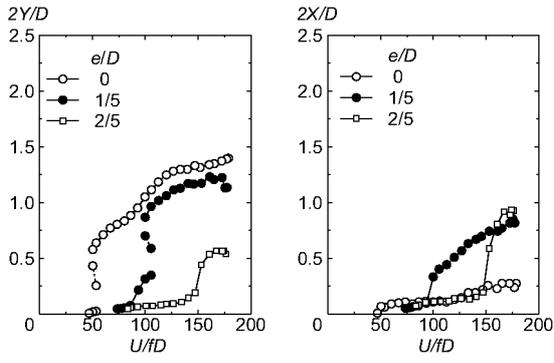
4. 円柱に作用する非定常圧力

4.1 空力仕事の定義

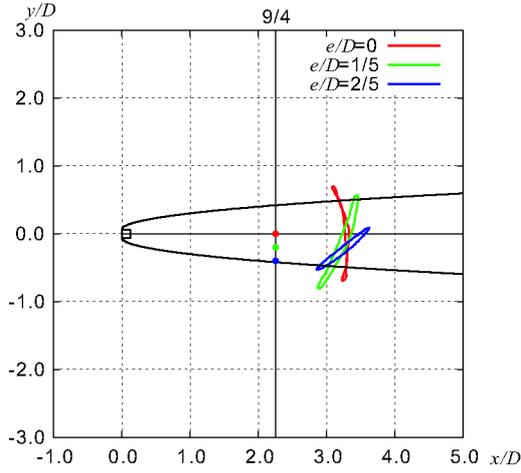
本研究では計測された円柱の表面圧力 $P(\beta, t)$ は、次式に示すアンサンブル平均によって位相平均処理をした。

$$\tilde{P}(\beta, t^*) = \frac{1}{N_{t^*}} \sum_{i=1}^{N_{t^*}} P(\beta, (i-1+t^*)T) \quad (2)$$

ここで、 β は下流円柱の表面の位置を表しており、図7に示すように円柱の上流側のよどみ点を基準に時計回



(a) 主流直交方向 (b) 主流方向



(c) リサーチ曲線 ($U/fD = 175$)

図-4 2自由度時の応答特性 ($d/D = 1/8, c/D = 9/4$)

りに正ととる角度である。また、 t^* は振動周期 T に対する相対時間 $t^* = t/T (0 \leq t \leq T, 0 \leq t^* \leq 1)$ 、 N_{t^*} は時刻歴データに含まれている t^* に該当するデータの数を表している。こうして求められた $\tilde{P}(t^*)$ は、円柱の動きに同期した圧力変動成分ということになる。一方で、円柱の動きに対して非同期の圧力変動は、アンサンブル平均値に対する偏差量として各位相に対して次式によって評価できる。

$$\tilde{P}_{\text{rms}}(\beta, t^*) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_{t^*}} (P(\beta, (i-1+t^*)T) - \tilde{P}(\beta, t^*))^2}{N_{t^*}}} \quad (3)$$

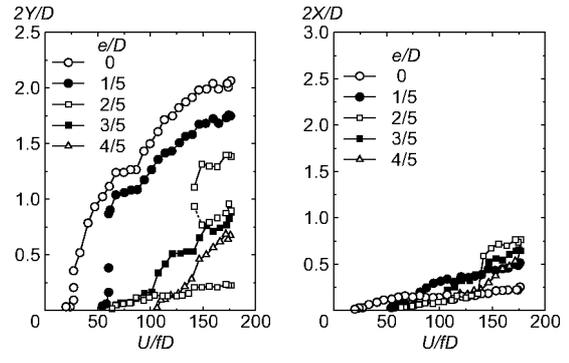
ここで、 $\tilde{P}_{\text{rms}}(\beta, t^*)$ は角柱によって生じるカルマン渦や後流内の乱流に起因する不規則な圧力変動の強さを反映する量として、本論文ではアンサンブル変動圧力と呼ぶことにする。

また、求められたアンサンブル平均された圧力 $\tilde{P}(\beta, t^*)$ 、アンサンブル変動圧力 $\tilde{P}_{\text{rms}}(\beta, t^*)$ は圧力係数を用いて次式のようにも表現できる。

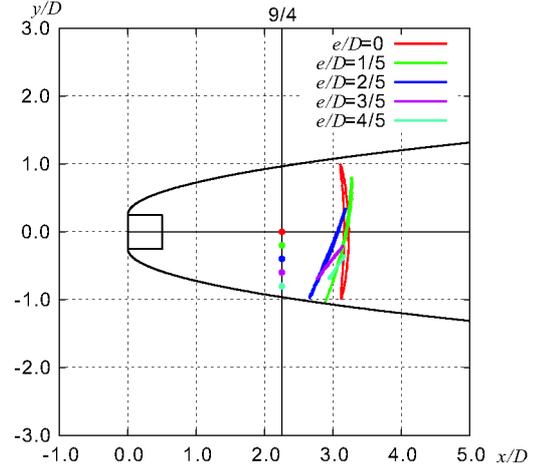
$$\tilde{P}(\beta, t^*) = \frac{1}{2} \rho U^2 C_P(\beta, t^*) \quad (4)$$

$$= \frac{1}{2} \rho U^2 \{ \bar{C}_P(\beta) + C'_P(\beta, t^*) \} \quad (5)$$

$$\tilde{P}_{\text{rms}}(\beta, t^*) = \frac{1}{2} \rho U^2 C_{P_{\text{rms}}}(\beta, t^*) \quad (6)$$

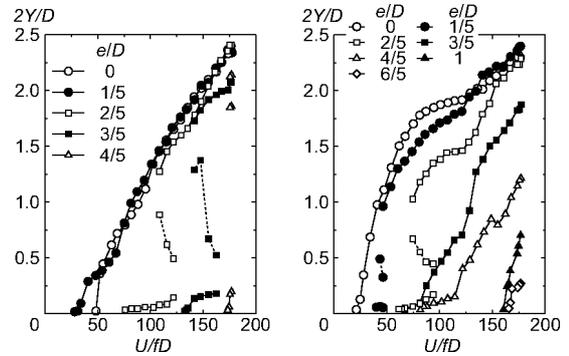


(a) 主流直交方向 (b) 主流方向



(c) リサーチ曲線 ($U/fD = 175$)

図-5 2自由度時の応答特性 ($d/D = 1/2, c/D = 9/4$)



(a) $d/D = 1/8$

(b) $d/D = 1/2$

図-6 主流直交1自由度時の応答特性 ($c/D = 9/4$)

ここで、 $C_P(\beta, t^*)$ は、瞬間圧力係数、 $\bar{C}_P(\beta)$ および C'_P は平均圧力係数、変動圧力係数であり、 $C_{P_{\text{rms}}}$ についてはアンサンブル変動圧力係数と呼ぶことにする。

次に変動圧力または変動揚力が振動一周期 T の間になす主流直交方向の無次元仕事 W_{PY}^* 、 W_L^* は次式で定義される。

$$W_{PY}^*(\beta) = \frac{W_P(\beta)}{\frac{1}{2} \rho U^2 \cdot Y} \quad (7)$$

$$= \int_0^1 -C'_P(\beta, t^*) \sin \beta \frac{\dot{y}(t^*)T}{Y} dt^*$$

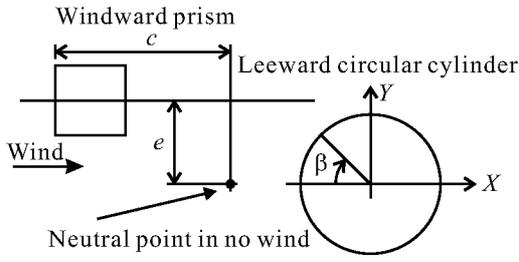


図-7 β の定義

$$= \int_0^1 W_{PY}^*(\beta, t^*) dt^* \quad (8)$$

$$W_L^* = \frac{W_L}{\frac{1}{2} \rho U^2 \cdot Y \cdot D} \quad (9)$$

$$= \int_0^1 W_L^*(t^*) dt^* \quad (10)$$

$$= \int_0^1 \int_{-\pi}^{\pi} W_{PY}^*(\beta, t^*) d\beta dt^*$$

$$= \int_0^1 \int_{-\pi}^{\pi} -C_p'(\beta, t^*) \sin \beta \frac{\dot{y}(t^*) T}{Y} d\beta dt^*$$

ここで、 $\dot{y}(t^*)$ は、相対時刻 t^* における主流直交方向の円柱の速度である。

4.2 直列配置における励振力の発生機構 ($e/D = 0$)

図 8 に $d/D = 1/2$, $e/D = 0$, $c/D = 9/4$ のケースにおける (a) 変位の時刻歴 $x(t^*)$, $y(t^*)$, (b) アンサンブル平均で求めた瞬間圧力係数 $C_p(\beta, t^*)$, (c) アンサンブル変動圧力係数 $C_{Prms}(\beta, t^*)$, (d) 変動圧力係数 $C_p'(\beta, t^*)$, (e) 変動圧力がなす主流直交方向の仕事率 $W_{PY}^*(\beta, t^*)$, (f) 変動揚力がなす主流直交方向の仕事 $W_L^*(t^*)$, (g) 円柱表面の各点に作用する変動圧力 $C_p'(\beta, t^*)$ が 1 周期の間になす主流直交方向の仕事を示す。

図 8(b) を見ると、強い正圧が作用する範囲の中心が $\beta = +10^\circ \sim -10^\circ$ で移動していることがわかる。これは、正圧が生じている間、円柱が角柱の後流の外側に出ていることを表していると考えられる。また、1 周期の間に 2 回正圧が生じていることから、円柱は 1 周期の間に 2 度角柱の後流の外側に出ていると判断できる。

次に、図 8(c) を見ると、 $t^* = 0 \sim 0.2$ において、 $\beta = -60^\circ$ を中心に、強い圧力変動が生じていることが分かる。この圧力変動は、先にも述べたように円柱の運動に同期しない成分であり、円柱は角柱の後流の上方向に位置していることが図 8(b) より明らかであり、角柱の上側隅角部より剥離したせん断流の乱れに起因するものと考えられる。また、 $t^* = 0.2 \sim 0.45$ の範囲では、 $\beta = -60^\circ \sim -10^\circ$ および $\beta = +10^\circ \sim +60^\circ$ の範囲を中心とする強い圧力変動を含む領域が分かれて生じている。この 2 つの領域に作用する強い圧力変動は、角柱の上下隅角部それぞれから剥離した時間平均的なせん断流

に含まれる流下渦に起因する乱れによるものである。準定常的に考えた場合、応答変位 $y(t^*) = 0$ となる時刻 $t^* = 0.31$ を中心に等圧線の分布は点対称な状態となって現れるはずだが、実際には遅れている。つまり、円柱が角柱の後流を横切るときには、角柱単独の状態に比べて角柱後流は円柱から少し離れた位置に移動しており、円柱が角柱後流に入るタイミングが遅れたと考えられる。

図 8(d) では、負圧の領域が円柱の動きに合わせて下面から上面、上面から下面への移動していることがわかる。この圧力変化も後流を横切ることによって生じている。

次に、図 8(e) に示した変動圧力が主流直交方向になす仕事を見ると、 $t^* = 0 \sim 0.3$ および $t^* = 0.5 \sim 0.8$ において、 $\beta = +60^\circ \sim +90^\circ$ および $\beta = -30^\circ \sim -90^\circ$ のあたりに正の仕事をしている範囲が現れている。変動揚力が主流直交方向になす仕事の時間変化を示した図 8(f) を併せて見ると、1 周期の全仕事を正としているのは、 $t^* = 0 \sim 0.3$ と $t^* = 0.5 \sim 0.8$ に生じている正の仕事が原因であり、これは正から負の仕事への移り変わるタイミングが遅れることによって正の仕事が作用する時間が負の仕事が作用する時間に比べて長くなったことによるものと解釈できる。

この遅れが円柱が後流を横切るときに生じていた後流の移動の遅れによるものであることは先の結果と合わせても明らかである。

図 8(g) を見ると、偏心のない上下対象の状態では、圧力が 1 周期の間に主流直交方向になす仕事はほぼ上下対象に分布しており、円柱の全表面において正の仕事をしていることが分かる。

以上の結果から、このケースにおいては、角柱の後流の動き、特に静止状態に比べて遅れた動きによって励振力が生じていることが明らかとなった。

4.3 千鳥配置における励振力の発生機構 ($e/D = 3/5$)

図 9 に $d/D = 1/2$, $e/D = 3/5$, $c/D = 9/4$ の千鳥配置状態で得られた非定常圧力の時刻歴および仕事の変化を示す。(a)~(g) の各図の意味は図 8 と同様である。

図 9(b) を見ると、 $\beta = -10^\circ$ を中心に、1 周期の間に 1 回、強い正圧が作用する領域が現れている。つまり、この条件では、円柱は 1 周期に 1 度、角柱後流の外に出ているということになる。

次に図 9(c) を見ると、 $\beta = -90^\circ$ 付近ではアンサンブル変動圧力が 1 周期を通じて強い変動を保っている。この変動は、円柱の運動に同期しておらず、かつ変動の強さもほとんど変化しないことから角柱後流の流れとは無関係と判断でき、円柱下面から継続的に生じている剥離流れによるものと考えられる。また、主流直交方向の変位が最大となり円柱が角柱後流に最も近づいた状態では、 $\beta = -30^\circ$ 付近のアンサンブル変動圧力が

強くなっているが、これは、角柱の下側の隅角部からの剥離流れがこの付近に再付着しているためと考えられる。

また、図 9(b) より、 $t^*=0.25\sim 0.75$ において $\beta=-10^\circ$ 付近の瞬間圧力が正となっているが、そのとき同じ位置のアンサンブル変動圧力は弱まっている。このことも、円柱の変位が最小、すなわち円柱が角柱後流から最も離れた状態では円柱が後流から完全に外に出ていることを示している。同じタイミングで、 $\beta=+50^\circ$ 付近のアンサンブル変動圧力が強まっているが、これは角柱の下部隅角部から剥離した時間平均的なせん断層を流下する渦に起因する乱れによるものと判断できる。

図 9(e) より、 $\beta=+45^\circ\sim +120^\circ$ の範囲の変動圧力がなす主流直交方向の仕事が $t^*=0\sim 0.35$ および $t^*=0.5\sim 0.75$ の範囲で正となっているが、この正の仕事が図 9(f) に示した変動揚力の正の仕事の原因であることが分かる。また、図 9(g) に示した 1 周期あたりに円柱表面の変動圧力が主流直交方向にした仕事の分布を併せて見ると、励振力のほとんどが、この $\beta=+45^\circ\sim +120^\circ$ の範囲で生じていることが分かる。その一方で、円柱下面側の圧力変動は励振力に対してほとんど寄与していない。

以上の検討から、千鳥配置の条件下では、角柱からの 2 つの剥離せん断層のうちの 1 つだけの挙動によって励振力が生じることもあるということが明らかとなった。

5. 円柱周りの流れの状態

図 10 および 11 に $d/D=1/2$ の場合の $e/D=0$ および $e/D=3/5$ の条件下で撮影された可視化画像を示す。前者は $t^*=0.20, 0.25$ および 0.45 の各瞬間の画像であり、後者は $t^*=0.20$ および 0.50 の瞬間を捉えたものである。それぞれの瞬間について、外部流と内部流の瞬間流れ場、内部流のみの瞬間流れ場と、内部流の画像に位相平均を施したアンサンブル平均流れ場を示しており、右側に示しているのは同じ時刻における瞬間圧力分布(赤線)とアンサンブル変動圧力分布(青線)である。なお、これまでの考察からも明らかなように、ウェイクエクサイテーションにおける流れの作用は、瞬間的な流れ場よりも流下渦の影響を無視した位相平均的な流れ場が支配的と考えられる。このため、ここでは角柱によって生じる時間平均的な流れ場に基づいた表現とし、剥離せん断層という表現も瞬間的な流れ場ではなく時間平均的なせん断層を意味することを予め断っておく。

図 10(a) を見ると、 $t^*=0.20$ において $\beta=-120^\circ\sim -30^\circ$ および $\beta=-30^\circ\sim +60^\circ$ の範囲に生じているアンサンブル変動圧力は角柱から生じた 2 つの剥離せん断層がぶつかることで生じていることが分かる。また、 $t^*=0.25$ (図 10(b)) においても円柱上流側の上面側、下

面側にそれぞれ生じているアンサンブル変動圧力が角柱からの 2 つの剥離せん断層によって生じていることが明らかである。

そして、図 10(c) に示した $t^*=0.45$ の流れでは、角柱下部の隅角部から生じた剥離せん断層が円柱の上側を流下していることがはっきりと確認できており、圧力分布より推定した流れの状況が実際に生じていたことが明らかとなった。

一方で、図 11(a) の結果より、 $\beta=+50^\circ\sim +120^\circ$ の範囲と $\beta=-30^\circ$ 付近で強まっていたアンサンブル変動圧力は、角柱の上下からの剥離せん断層により生じたものであることが分かる。また、 $t^*=0.50$ のときに、円柱の上側に生じていたアンサンブル変動圧力が角柱の下部隅角部から生じた剥離せん断層の再付着によって発生していることも確認できる。

以上の結果より、対象配置、千鳥配置のいずれの場合についても励振力の主な原因と考えられた圧力分布と流れの状態は、可視化試験からも確認することができた。

6. まとめ

角柱後流に配置した円柱のウェイクエクサイテーションについて、自由振動試験、非定常圧力計測試験、可視化試験を通じて検討した結果として明らかとなったことを以下に示す。

- (1) 角柱の幅 d/D は、それによって決定付けられる後流の幅によって円柱の応答振幅を変化させている。
- (2) 角柱と円柱の主流直交方向の偏心距離 e/D は、ハードフラッター型とソフトフラッター型の応答特性を決定付け、2 自由度支持状態では、卓越応答方向も支配している。
- (3) 主流方向の自由度は主流直交方向の応答振幅を低減させる働きがある。
- (4) 円柱の励振力は角柱からの平均的な剥離流れの移動に伴って生じる圧力変動に起因している。
- (5) アンサンブル変動圧力は円柱周辺における角柱からの位相平均的な剥離せん断層の状態を明確に反映している。
- (6) 角柱からの位相平均的な剥離せん断層の動きが円柱のウェイクエクサイテーションにおいて非常に重要な役割をしている。

今後は、これらの検討結果を円柱同士のウェイクエクサイテーションの発生機構の理解へ反映させるため、円柱の後流と角柱の後流との共通点および相違点を整理、検討していく予定である。

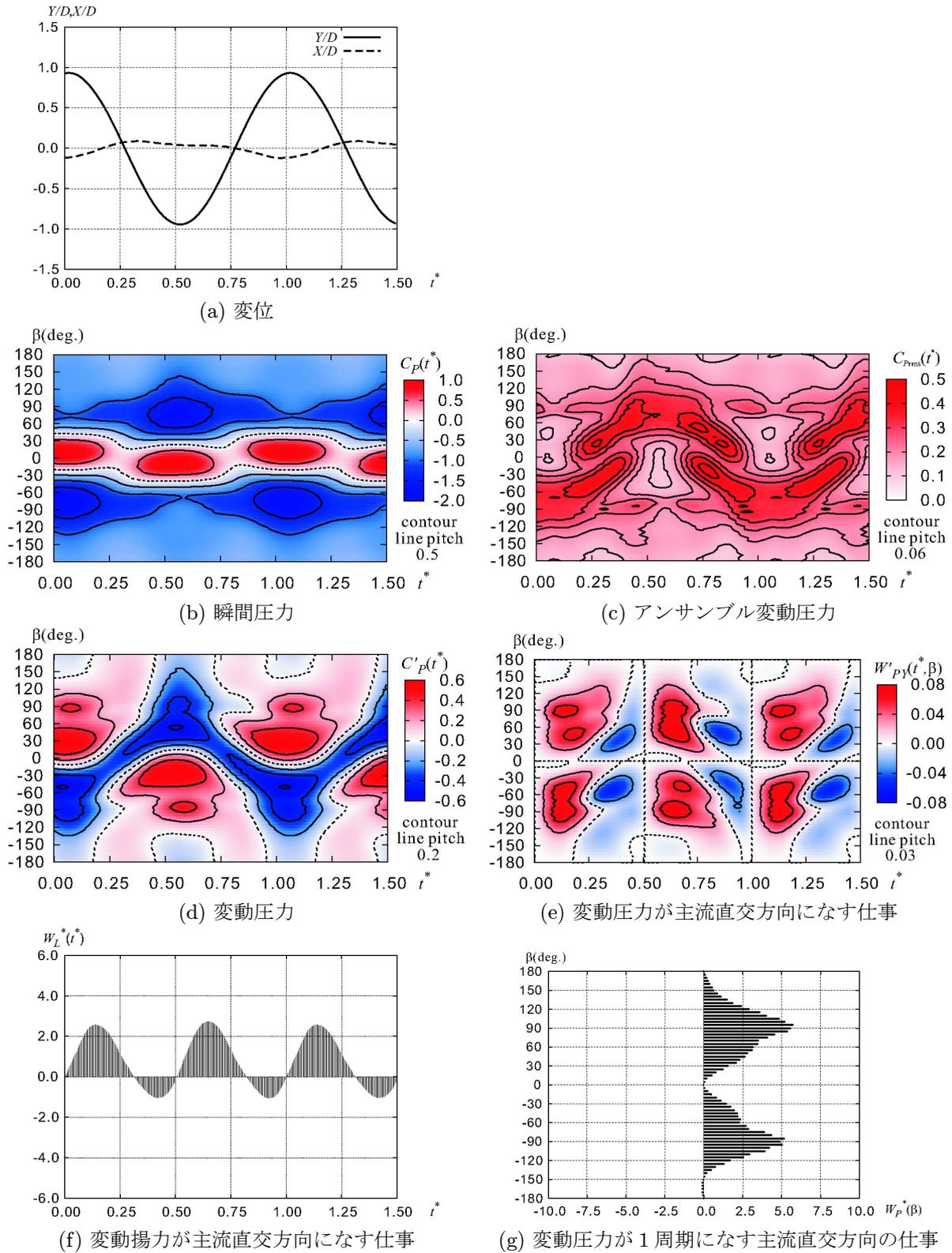


図-8 アンサンブル平均による非定常圧力と仕事 (2自由度, $d/D = 1/2$, $c/D = 9/4$, $e/D = 0$, $U/fD = 175$)

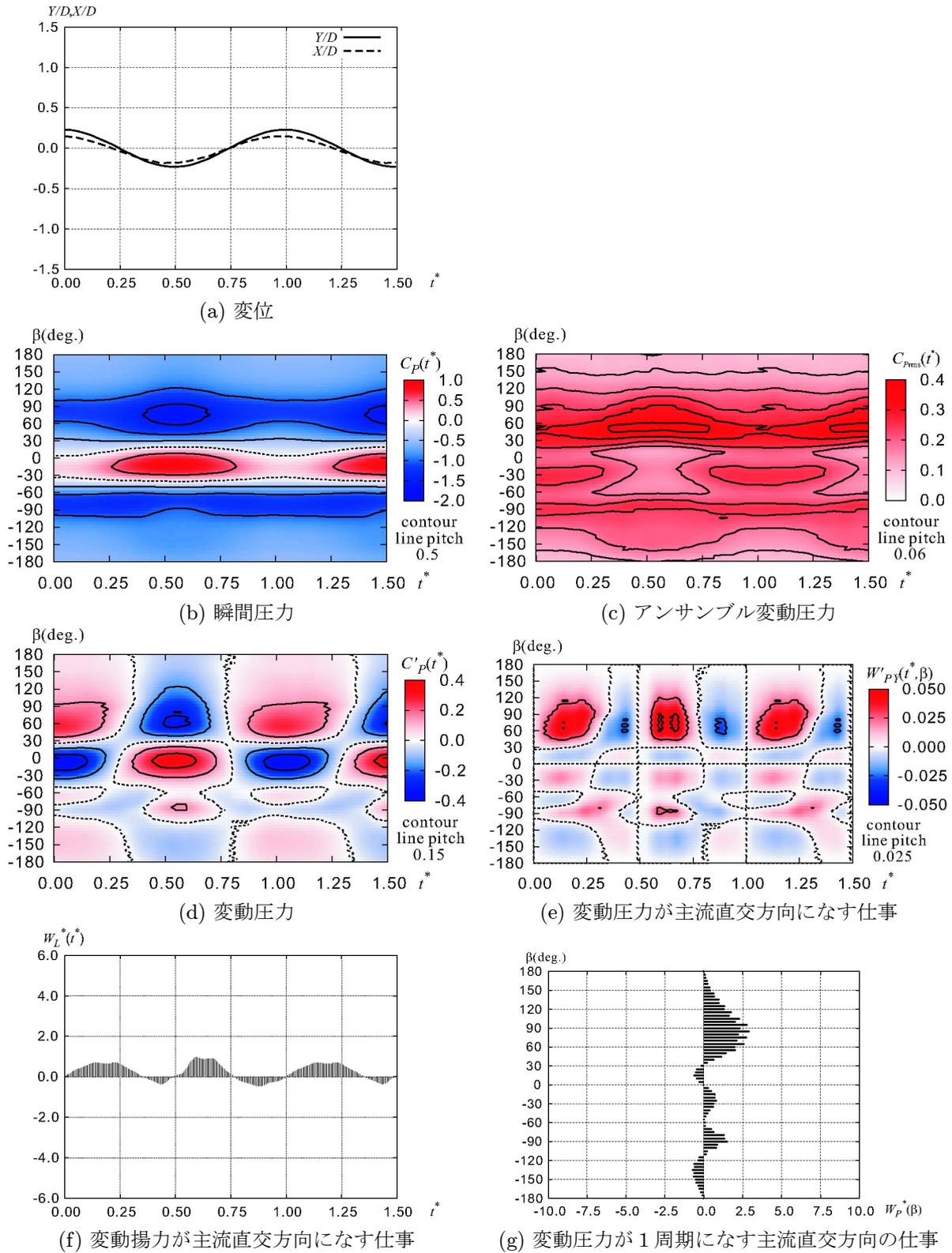


図-9 アンサンブル平均による非定常圧力と仕事 (2自由度, $d/D = 1/2$, $c/D = 9/4$, $e/D = 3/5$, $U/fD = 175$)

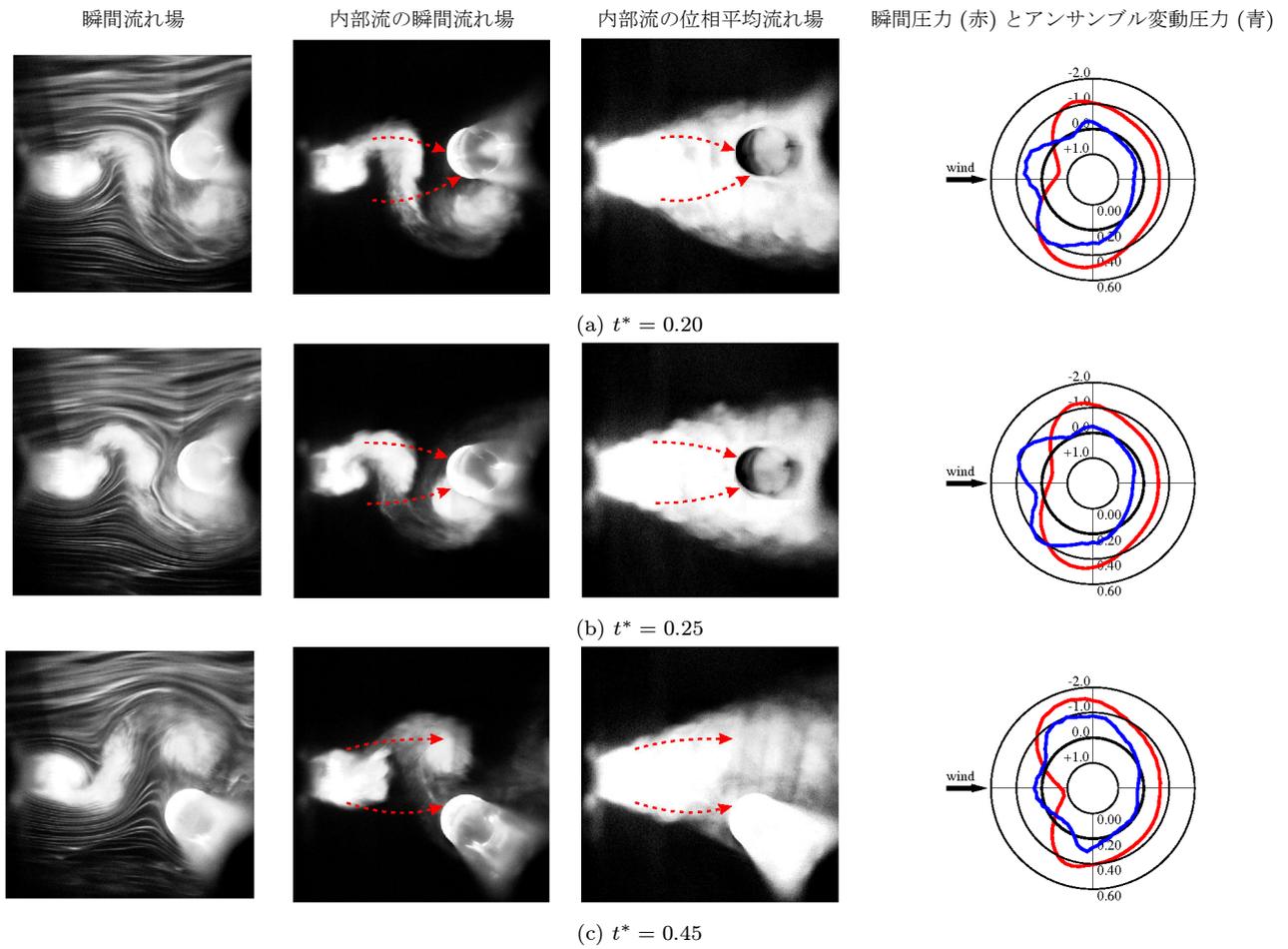


図-10 上流角柱と振動円柱間の流れ (2自由度, $d/D = 1/2$, $c/D = 9/4$, $e/D = 0$, $U/fD = 175$)

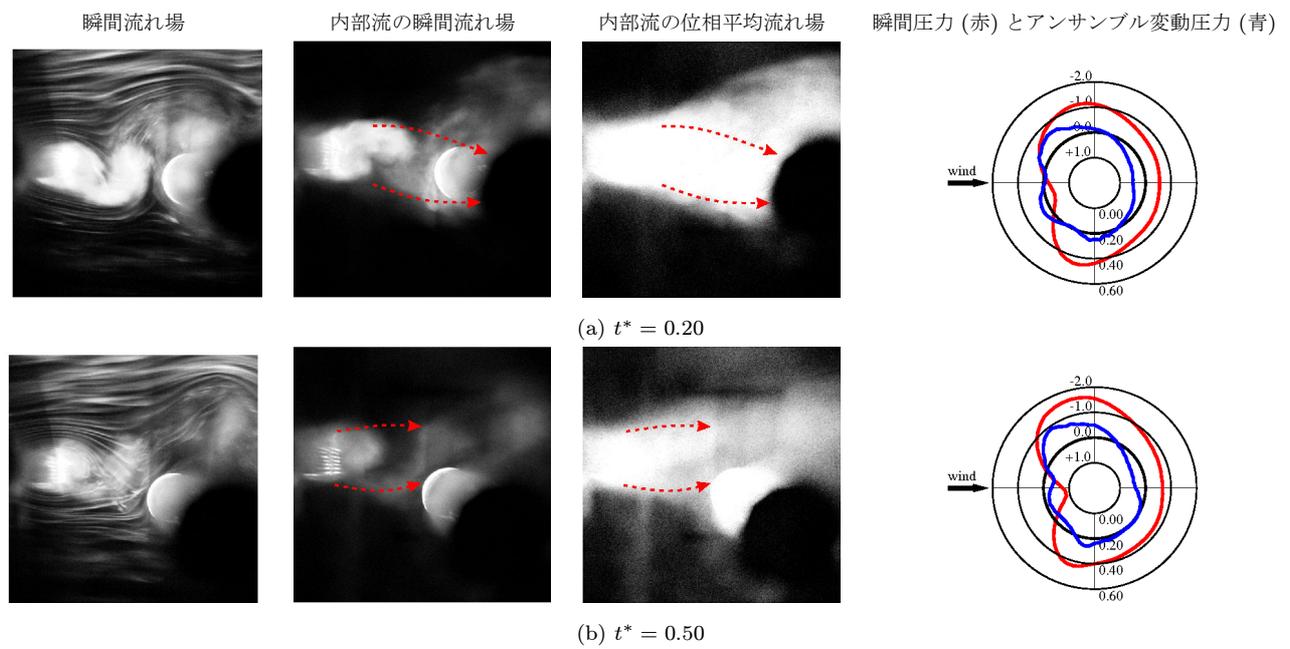


図-11 上流角柱と振動円柱間の流れ (2自由度, $d/D = 1/2$, $c/D = 9/4$, $e/D = 3/5$, $U/fD = 175$)

参考文献

- 1) A. Simpson : On the Flutter of a Smooth Circular Cylinder in a Wake, *Aeronautical Quarterly*, pp.25 – 41, 1971.
- 2) K. R. Cooper and R. L. Wardlaw : Aeroelastic instabilities in wakes, *Proceedings of Third conference on Wind Effects on Buildings and Structures*, pp.647–655, 1971.
- 3) H. Ruscheweyh : Practical Experiences with Flow-Induced Vibrations, *Proceedings of IAHR/IUTAM Symposium*, pp.115–125, 1979.
- 4) 宇都宮英彦, 鎌倉米康 : 近接する並列円柱系の空気力学挙動, *土木学会論文集*, 336号, pp.1–8, 1983.
- 5) F. Nagao, H. Utsunomiya, M. Noda, M. Imoto and R. Sato, "Aerodynamic properties of closely spaced triple circular cylinders" *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91, 75–82, 2003.
- 6) 岡島厚, 種々な断面辺長比の矩形柱周りの流れ, *日本風工学会誌*, 第17号, pp.1–19, 1983.
- 7) 宇都宮英彦, 長尾文明, 野田稔, 片山真文, 郡崇志, 角柱後流内の円柱のウェイクエクサイテーションに関する研究, 第18回風工学シンポジウム論文集, pp.395 – 400, 2004.

(2008年9月18日受付)